

耐津波設計に係る設工認審査ガイドの改正及びこれに対する意見公募の実施

令和 4 年 10 月 19 日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、「耐津波設計に係る設工認審査ガイド（原管地発第 1306196 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）」（以下「ガイド」という。）の改正案及び意見公募の実施の了承について諮るものである。

2. 経緯

令和 2 年度第 40 回原子力規制委員会（令和 2 年 11 月 25 日）において、原子力規制庁は、平成 26～28 年にかけて公表した津波波圧評価に係る 3 編の NRA 技術報告¹の成果を踏まえ、津波波圧の評価手法を審査で確認する観点から取りまとめた「津波波圧評価に係る確認事項（案）」（以下「波圧確認事項」という。）を作成し、これをガイドの別添とする方針を報告した。その際に波圧評価式の保守性の考え方について説明するよう指摘を受けた。

その指摘に対して、令和 3 年度第 21 回原子力規制委員会（令和 3 年 7 月 21 日）において、保守性の考え方とともに見直し内容について説明を行ったところ、3 編の NRA 技術報告とは別に、再検討した波圧評価式に関する NRA 技術報告²を作成し、それに基づく波圧確認事項を策定の上、ガイドの改正案を原子力規制委員会に諮ることとされた（参考）。

¹ 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について、NTEC-2014-4001、平成 26 年 12 月

— 持続波圧を対象に、フルード数が 1 以下の範囲であれば、国交省の暫定指針の水深係数 3 を適用できることを確認した。

原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波段波の影響について、NTEC-2015-4001、平成 27 年 10 月

— 段波波圧を対象に、概して持続波圧による影響よりも小さいことを確認した。段波波圧による影響が持続波圧よりも大きくなる場合も、国交省の暫定指針の考え方を適用できることを確認した。

原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について、NTEC-2016-4001、平成 28 年 12 月

— 持続波圧を対象に、フルード数が 1 を超える場合、津波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深と流速に基づいた評価方法が適用できることを確認した。

² 原子力規制委員会、NRA 技術報告 防潮堤に作用する最大持続波圧評価式の提案、NTEC-2022-4001、令和 4 年 7 月

— 持続波圧を対象に、フルード数が 1 を超える場合に適用する、津波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深と流速に基づいた評価式を策定した。

3. 本ガイド改正案

別紙のガイドの改正案を了承いただきたい。

改正のポイントは以下のとおり。

- 津波波圧評価対象とする施設・設備を明確化する。
- 津波波圧の分類（段波波圧³、持続波圧⁴）を網羅するとともに、津波波圧評価に係る手法・手順を体系化する。
- 防潮堤等に作用する入力津波の波圧評価において、上記を踏まえた確認事項及びその解説をガイドの別添に追加する。

なお、別添の波圧確認事項については、これまでの審査結果に影響を及ぼす内容はない。

4. 意見公募の実施

別紙の改正案について、行政手続法（平成5年法律第88号）に定める命令等に該当するものではないが、任意の意見公募を実施することを了承いただきたい。

実施期間： 令和4年10月20日から11月18日まで（30日間）

実施方法： 電子政府の総合窓口（e-Gov）、郵送及びFAX

5. 今後の予定

意見公募の結果について原子力規制委員会の了承を諮るとともに、ガイドの改正について原子力規制委員会に付議し、決定後同日に施行する。

（添付資料）

別紙 耐津波設計に係る設工認審査ガイドの一部改正について（案）

参考 NRA技術報告における津波の持続波圧評価式の再検討―令和2年度第40回原子力規制委員会指摘事項への対応等―（令和3年度第21回原子力規制委員会（令和3年7月21日）資料7）抜粋

³ 最初に防潮堤等に衝突する津波が与える短時間で大きく変化する波圧。

⁴ 段波波圧の後の継続時間の長い波圧で、長時間に渡り一定の範囲の波圧が防潮堤等に作用する。

(案)

(別紙)

改正 令和 年 月 日 原規技発第 号 原子力規制委員会決定

令和 年 月 日

原子力規制委員会

耐津波設計に係る設工認審査ガイドの一部改正について

耐津波設計に係る設工認審査ガイド（原管地発第 1306196 号）の一部を、別表により改正する。

附 則

この規程は、令和 年 月 日から施行する。

別表 耐津波設計に係る設工認審査ガイド 新旧対照表

(下線部分は改正部分)

改正後	改正前
目次	目次
1. (略) 1	1. (略) 1
2. (略) 4	2. (略) 4
3. (略) 10	3. (略) 10
4. (略) 27	4. (略) 27
5. (略) 36	5. (略) 36
6. (略) 41	6. (略) 41
7. (略) 44	7. (略) 44
8. (略) 50	8. (略) 50
<u>別添 津波波圧評価に係る確認事項</u> 52	(新設)
1. ・2. (略)	1. ・2. (略)
3. 津波防護設計に関する事項	3. 津波防護設計に関する事項
3.1～3.6 (略)	3.1～3.6 (略)
3.7 津波防護施設、浸水防止設備の設計・評価に係る検討事項	3.7 津波防護施設、浸水防止設備の設計・評価に係る検討事項
3.7.1 (略)	3.7.1 (略)
3.7.2 津波影響軽減施設・設備の扱い	3.7.2 津波影響軽減施設・設備の扱い
【規制基準における要求事項等】 (略)	【規制基準における要求事項等】 (略)
【確認内容】	【確認内容】
(1)・(2) (略)	(1)・(2) (略)

改正後	改正前
<p>(3) (1)の分類ごとに、以下のように耐津波性、地震による影響等を確認する。確認に当たっては、「4.津波防護施設に関する事項」、「5.浸水防止設備に関する事項」の各項目を参照する。</p> <p>① 海中設置物</p> <p>a) (略)</p> <p>b)津波による荷重の設定に際しては、浮力、漂流物の影響、津波の繰り返しの来襲を考慮するとともに、入力津波に対して十分な余裕を考慮すること。<u>(詳細は別添 津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。)</u> また、余震による荷重と津波による荷重の荷重組合せを考慮すること。</p> <p>c) (略)</p> <p>② 陸上設置物</p> <p>a) (略)</p> <p>b)津波による荷重の設定に際しては、漂流物の影響、津波の繰り返しの来襲を考慮するとともに、入力津波に対して十分な余裕を考慮すること。<u>(詳細は別添 津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。)</u> また、余震による荷重と津波による荷重の荷重組合せを考慮すること。</p> <p>c)・d) (略)</p> <p>(4) (略)</p> <p>3.8 (略)</p> <p>4. 津波防護施設に関する事項</p> <p>4.1 津波防護施設の設計方針</p>	<p>(3) (1)の分類ごとに、以下のように耐津波性、地震による影響等を確認する。確認に当たっては、「4.津波防護施設に関する事項」、「5.浸水防止設備に関する事項」の各項目を参照する。</p> <p>① 海中設置物</p> <p>a) (略)</p> <p>b)津波による荷重の設定に際しては、浮力、漂流物の影響、津波の繰り返しの来襲を考慮するとともに、入力津波に対して十分な余裕を考慮すること。<u>また、余震による荷重と津波による荷重の荷重組合せを考慮すること。</u></p> <p>c) (略)</p> <p>② 陸上設置物</p> <p>a) (略)</p> <p>b)津波による荷重の設定に際しては、漂流物の影響、津波の繰り返しの来襲を考慮するとともに、入力津波に対して十分な余裕を考慮すること。<u>また、余震による荷重と津波による荷重の荷重組合せを考慮すること。</u></p> <p>c)・d) (略)</p> <p>(4) (略)</p> <p>3.8 (略)</p> <p>4. 津波防護施設に関する事項</p> <p>4.1 津波防護施設の設計方針</p>
【規制基準における要求事項等】	【規制基準における要求事項等】

改正後	改正前
(略)	(略)
<p>【審査における確認事項】</p> <p>(1) (略)</p> <p>(2) 入力津波に対して津波防護機能が十分保持できる設計がなされていること。具体的な内容については、以下のとおりである。</p> <p>① (略)</p> <p>② 荷重の設定</p> <p>a) 津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定に関して、考慮する知見及びそれらの適用性に留意の上、用いられていること。(詳細は別添 津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。)</p> <p>b)・c) (略)</p> <p>③ (略)</p>	<p>【審査における確認事項】</p> <p>(1) (略)</p> <p>(2) 入力津波に対して津波防護機能が十分保持できる設計がなされていること。具体的な内容については、以下のとおりである。</p> <p>① (略)</p> <p>② 荷重の設定</p> <p>a) 津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定に関して、考慮する知見及びそれらの適用性に留意の上、用いられていること。</p> <p>b)・c) (略)</p> <p>③ (略)</p>
<p>【確認内容】 (略)</p> <p>4.2～4.4 (略)</p> <p>4.5 荷重評価</p>	<p>【確認内容】 (略)</p> <p>4.2～4.4 (略)</p> <p>4.5 荷重評価</p>
<p>【審査における確認事項】</p> <p>(略)</p>	<p>【審査における確認事項】</p> <p>(略)</p>
<p>【確認内容】</p> <p>①津波荷重の算定</p> <p>a)～c) (略)</p> <p>d)入力津波の伝播及び遡上解析では、施設に作用する津波波圧の経時変化(段波波圧、持続波圧)に留意し、特に波圧が大きくなる段波波圧(衝撃波圧)が発生する場合、施設への影響を検討して</p>	<p>【確認内容】</p> <p>①津波荷重の算定</p> <p>a)～c) (略)</p> <p>d)入力津波の伝播及び遡上解析では、施設に作用する津波波圧の経時変化(段波波圧、持続波圧)に留意し、特に波圧が大きくなる段波波圧(衝撃波圧)が発生する場合、施設への影響を検討して</p>

改正後	改正前
<p>いること確認する。また、衝撃的な波圧については、ばらつきが大きくなることから、規格及び基準類、既往の研究等を参考にして、衝撃的な波圧を考慮した、荷重係数等の安全係数を設定していることを確認する。(詳細は別添 <u>津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。</u>)</p> <p>e)また、津波伝播及び遡上解析のばらつき要因として、海底面の形状や粗度が上げられる。入力津波の算定においては、これらの要因の感度解析により、施設に作用する荷重(波圧)が科学的合理性をもって安全側となるケースを抽出していることを確認する。(詳細は別添 <u>津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。</u>)</p> <p>f)なお、既往の波圧・波力算定式を用いて入力津波を設定する場合、それらの算定式の適用性を確認する。その一例としては、ばらつきを考慮した詳細解析によって求められる荷重値と比較すること等が考えられる。(詳細は別添 <u>津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。</u>)</p> <p>②③ (略)</p> <p>4.6・4.7 (略)</p> <p>5. 浸水防止設備に関する事項</p> <p>5.1・5.2 (略)</p> <p>5.3 水密扉、止水処理を施したハッチ、閉止板、開口部、貫通口等(外郭防護及び内郭防護)</p> <p>【確認内容】</p> <p>5.3.1 (略)</p> <p>5.3.2 荷重及び荷重の組合せ</p>	<p>いること確認する。また、衝撃的な波圧については、ばらつきが大きくなることから、規格及び基準類、既往の研究等を参考にして、衝撃的な波圧を考慮した、荷重係数等の安全係数を設定していることを確認する。</p> <p>e)また、津波伝播及び遡上解析のばらつき要因として、海底面の形状や粗度が上げられる。入力津波の算定においては、これらの要因の感度解析により、施設に作用する荷重(波圧)が科学的合理性をもって安全側となるケースを抽出していることを確認する。</p> <p>f)なお、既往の波圧・波力算定式を用いて入力津波を設定する場合、それらの算定式の適用性を確認する。その一例としては、ばらつきを考慮した詳細解析によって求められる荷重値と比較すること等が考えられる。</p> <p>②③ (略)</p> <p>4.6・4.7 (略)</p> <p>5. 浸水防止設備に関する事項</p> <p>5.1・5.2 (略)</p> <p>5.3 水密扉、止水処理を施したハッチ、閉止板、開口部、貫通口等(外郭防護及び内郭防護)</p> <p>【確認内容】</p> <p>5.3.1 (略)</p> <p>5.3.2 荷重及び荷重の組合せ</p>

改正後	改正前
<p>(1)・(2) (略)</p> <p>(3)津波による荷重</p> <p>①津波により設備に作用する荷重としては、静的荷重(静水頭圧)と動的荷重(波圧、衝撃力等)を考慮する。<u>(詳細は別添 津波波圧評価に係る確認事項を参照すること。)</u></p> <p>② (略)</p> <p>(4)～(6) (略)</p> <p>5.3.3～5.3.6 (略)</p> <p>6.～8. (略)</p>	<p>(1)・(2) (略)</p> <p>(3)津波による荷重</p> <p>①津波により設備に作用する荷重としては、静的荷重(静水頭圧)と動的荷重(波圧、衝撃力等)を考慮する。</p> <p>② (略)</p> <p>(4)～(6) (略)</p> <p>5.3.3～5.3.6 (略)</p> <p>6.～8. (略)</p>

津波波圧評価に係る確認事項

1. 基本事項

本資料は、耐津波設計に係る設工認審査ガイド(以下「ガイド」という。)のうち「3. 津波防護設計に関する事項」の「3.7.2 津波影響軽減施設・設備の扱い」、「4. 津波防護設計に関する事項」の「4.1 津波防護施設の設計方針」「4.5 荷重評価」及び「5. 浸水防止設備に関する事項」の「5.3.2 荷重及び荷重の組合せ」に関連するものであり、外郭防護に係る施設及び設備に作用する入力津波の波圧(以下「津波波圧」という。)評価に係る確認事項を整理したものである。

以下に、ガイドの規定箇所、本資料の適用対象及び本資料の適用範囲を示す。

【ガイドの規定箇所】

3.7.2 津波影響軽減施設・設備の扱い【確認内容】(3) ① b) ② b)

4.1 津波防護施設の設計方針【審査における確認事項】(2) ② a)

4.5 荷重評価【確認内容】① d) e) f)

5.3.2 荷重及び荷重の組合せ(3)①(例えば、外郭防護に係る津波防護施設に付属する水密扉等)

【本資料の適用対象】

外郭防護に係る施設及び設備のうち、津波波圧の影響を直接受ける陸域の構築物、海域にあり引き波時に設置面が露出する構築物等(以下これらを総称して「防潮堤等」という。)

海域にあり引き波時に設置面が露出する構築物として、例えば津波影響軽減施設及び設備としての防波堤、離岸堤、潜堤等が考えられる。

【本資料の適用範囲】

本資料は、津波波圧の分類及び分類に応じた津波波圧の評価方法並びにこれらの確認の手順及びその内容を示すものであり、防潮堤等に作用する荷重のうち入力津波による荷重を対象としている。それ以外の荷重及び荷重の組合せ、許容限界等の確認事項については、ガイドに記載のとおりとする。

また本資料は、国交省の暫定指針^{*1}、NRA 技術報告^{(参1)(参2)(参3)(参4)}及び防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省港湾局)(以下「国交省のガイドライン」という。)^(参5)に記載されている手法等について、その知見を適用するにあたっての確認事項をまとめたものである。

なお、本資料に記載されていない手法等であっても、その妥当性が適切に示された場合には、その手法等を用いることは妨げない。

^{*1} 東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針は、「国土交通省告示千三百十八号 津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法等を定める件」として、平成 23 年 12 月 27 日に告示されている。

2. 防潮堤等に作用する津波波圧評価に係る確認事項及び解説

2.1 津波波圧の分類及び考慮する知見の確認

防潮堤等に作用する津波波圧の分類及び考慮する知見の確認手順を図 2.1 に示す。

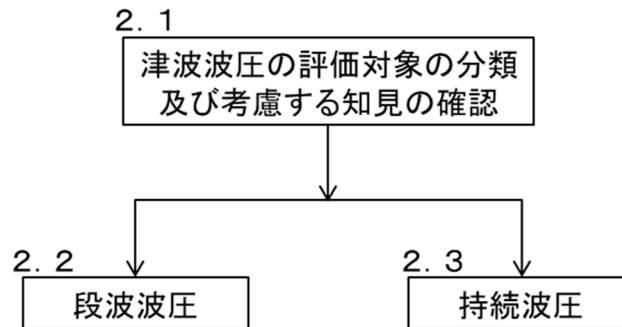


図 2.1 防潮堤等に作用する津波波圧の分類及び考慮する知見の確認手順

【確認事項】

- ①津波波圧として、段波波圧及び持続波圧の両波圧を評価対象としていること。
また、段波波圧及び持続波圧の分類の考え方が示されていること。

【解説】

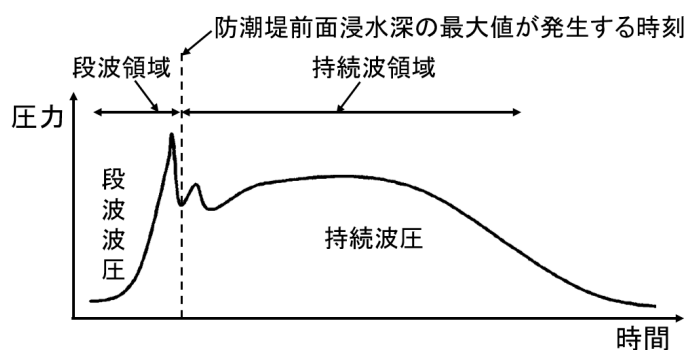
上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・「津波波圧として、段波波圧及び持続波圧の両波圧を評価対象としていること。」について、防潮堤等に作用する津波波圧には図 2.2 に示すように、段波波圧と持続波圧の 2 種類があり、防潮堤等の設計に当たっては、この 2 種類の津波波圧を個別に考慮する必要がある。
- ・「段波波圧及び持続波圧の分類の考え方が示されていること。」については、段波波圧と持続波圧の分類例として、防潮堤等前面浸水深^{*2}の最大値が発生する時刻より前の時間帯(段波領域)に生じる津波波圧を段波波圧、それよりも後の時間帯(持続波領域)に生じる津波波圧を持続波圧とする。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・段波波圧は、最初に防潮堤等に衝突する津波が与える短時間で大きく変化する波圧である。
- ・持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧で、長時間にわたり一定の範囲の波圧が防潮堤等に作用する。

^{*2} 津波が防潮堤等に作用してせり上がった際の防潮堤等の前面における津波の深さ。



出典) NRA 技術報告^(参1)

図 2.2 防潮堤等に作用する津波波圧の分類例

【確認事項】

②津波波圧(段波波圧及び持続波圧)の設定方法が示されていること、段波波圧及び持続波圧の設定の根拠として考慮する知見を明示していること及びこの知見の適用性について評価していること。

【解説】

上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・「知見の適用性について評価していること」については、知見の技術的妥当性を適切な査読論文実績等を確認すること。また、知見の適用条件が適用対象と合致していることを確認すること。
- ・「段波波圧及び持続波圧の設定の根拠として考慮する知見を明示していること」については、基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイドでは、「津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定に関して、考慮する知見(例えば、国交省の暫定指針等)及びそれらの適用性を確認する」としている。
- ・国交省の暫定指針を参照した場合は、考慮する知見として当該暫定指針が明示されている必要がある。

国交省の暫定指針に係る留意事項を以下に示す。

- ・津波波圧の分類(段波波圧及び持続波圧)は国交省の暫定指針で言及されていないため、本資料 2.1①により分類し、それぞれの波圧を設定するものとする。
- ・国交省の暫定指針は、地方公共団体によるハザードマップ等に示された想定浸水深により津波の設計用浸水深(η)を設定するとある(国交省の暫定指針 1.1 適用範囲 (1) 適用の確認)。一方で、その詳細には国交省の暫定指針で言及していない。そのため、設計用浸水深(η)は、水理試験及び解析あるいはその他の知見等から設定するものとする。

なお、国交省の暫定指針が参照する朝倉らの研究^(参6)では、防潮堤等がない場合を想定し、防潮堤等設置位置での津波の通過波の浸水深を設計用浸水深(η)に設定している。ここで、通過

波とは、防潮堤等がない場合の津波の流れを指し、主に陸側における浸水深や流速等の津波の特性の把握に用いる。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・国交省の暫定指針では、防潮堤等に作用する津波波圧は設計用浸水深(η)の3倍の高さに相当する静水圧分布としている。
- ・上記において、防潮堤等の最下部に作用する圧力(P)と設計用浸水深(η)に相当する静水圧との比を表す無次元数を水深係数(α)という。(図 2.3 参照)

$$P = \alpha \rho g \eta \quad (1)$$

α : 水深係数

※ α は国交省の暫定指針において3としている。

P : 防潮堤等の最下部に作用する圧力

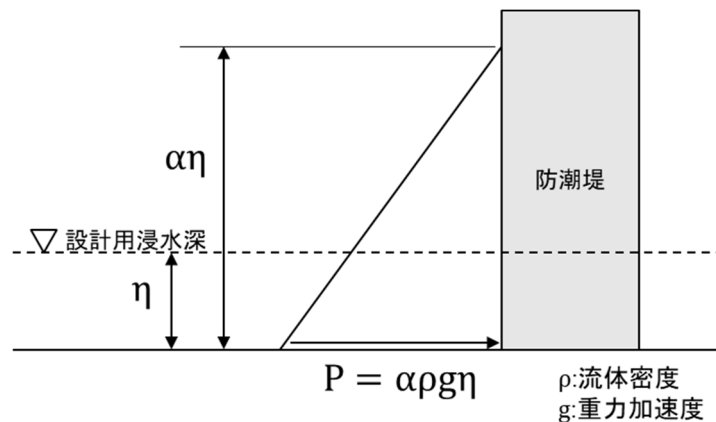
※ 前面の据付高さを基準高さ(防潮堤等の最下部の高さ)とする。

ρ : 海水(流体)密度

※ 海水密度をそのまま用いることを基本としたうえで、砂移動の解析条件である浮遊砂濃度については、不確かさを含めた上限設定とする。

g : 重力加速度

η : 設計用浸水深



出典) 国交省の暫定指針に対して一部加筆

図 2.3 国交省の暫定指針における設計波圧算定手法の概念

2. 2 防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認

防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認手順を図 2. 4 に示す。

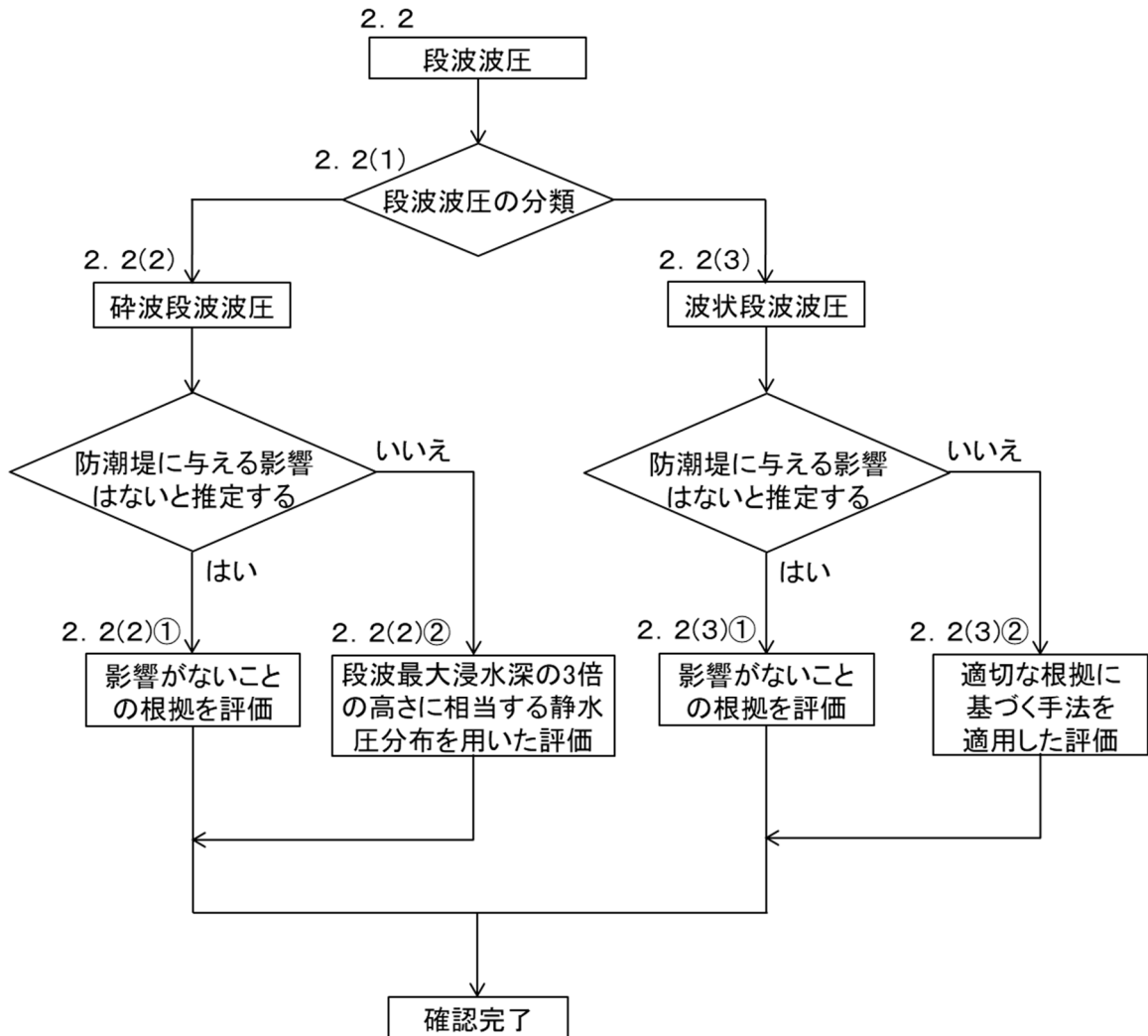


図 2. 4 防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認手順

(1) 段波波圧の分類

【確認事項】

- ① 防潮堤等に作用する段波波圧を砕波段波波圧及び波状段波波圧に分類し、両波圧を個別に評価対象としていること。

【解説】

上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・砕波段波及び波状段波の先端部の形状はいずれも急峻な壁状となる特徴を有しており、防潮堤等に作用した場合、構造健全性に影響を与える可能性が考えられることから、砕波段波波圧及び波状段波波圧について個別に評価が必要である。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・段波波圧は、砕波段波波圧及び波状段波波圧に分類される。
- ・砕波段波波圧は、津波の先端部が急峻な壁状となった後に波が砕け(砕波)、防潮堤等に作用する波圧である。
- ・波状段波波圧は、津波の先端部が複数の波に分裂(以下「ソリトン分裂波」という。)し、防潮堤等に作用する波圧である。

(2) 砕波段波波圧の影響評価

【確認事項】

- ① 防潮堤等に作用する砕波段波波圧の影響がないと推定する場合、その根拠が明確になっていること。その際、津波の影響評価の前提となる、砕波発生の有無及び発生位置については、適切な条件による水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより推定していること。

【解説】

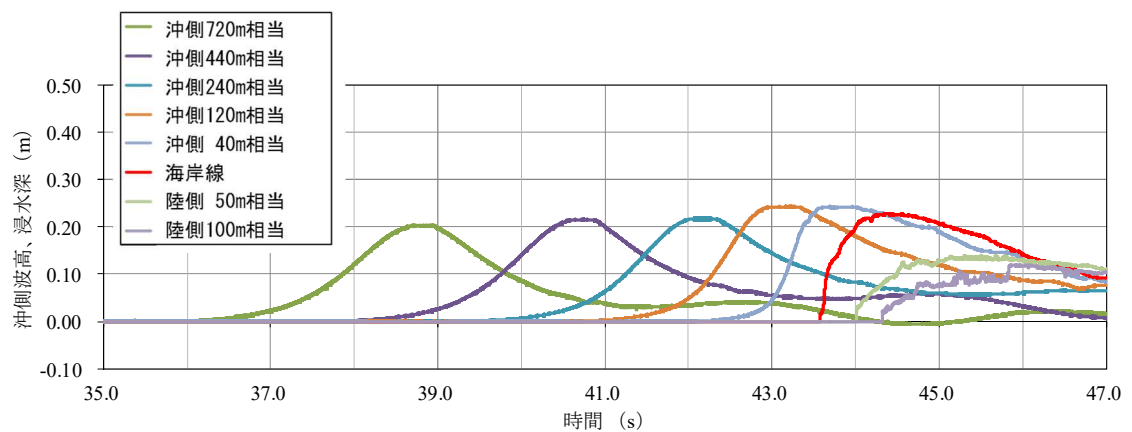
上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・「防潮堤等に作用する砕波段波波圧の影響」については、防潮堤等が海岸線近傍に設置されるとともに、防潮堤等の近傍で砕波が発生する等、複数の条件の重畳によっては、砕波段波波圧による影響が持続波圧による影響よりも大きくなる場合がある。このような場合には、砕波段波波圧が防潮堤等の構造健全性に与える影響を確認すること。
- ・「適切な条件による水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより推定していること」については、砕波段波波圧の影響を評価するため、防潮堤等の近傍における津波の砕波発生の有無を水理試験及び解析あるいは、そのいずれかにより推定することが重要である。砕波発生の可能性や発生場所等は、沖側波高、波形、周期、水深、海底の形状、海岸線の形状、陸側の形状等の複合要因に依存する。これらの複合要因を踏まえた上で、防潮堤等がない場合の津波通過波

の波高、波形等から、防潮堤等の近傍での碎波発生の有無又は碎波直前の状態の有無を確認すること。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

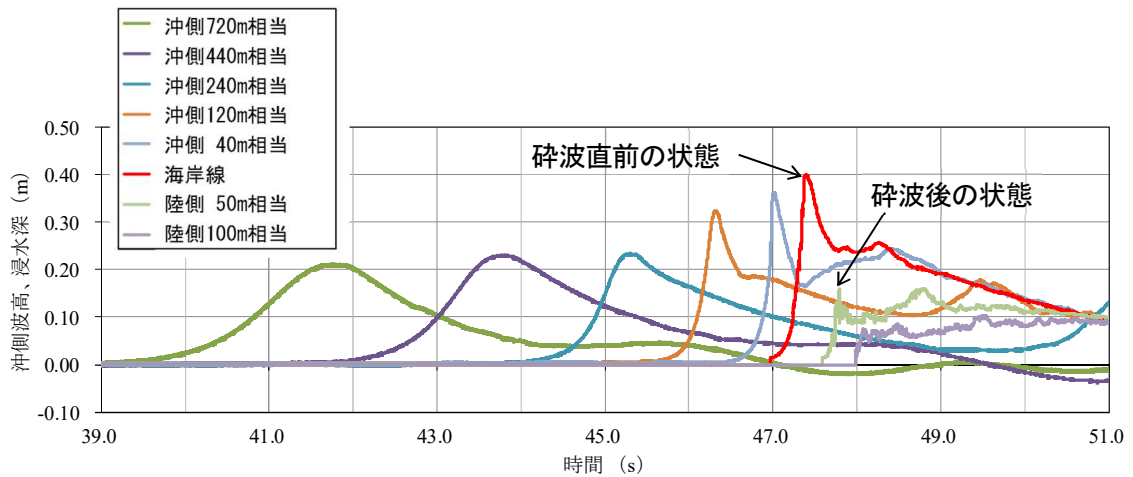
- ・碎波段波波圧の影響は、津波の碎波発生の有無及び発生位置によって大きく異なる。
- ・津波の碎波発生がないと推定する場合の例として、水理試験から得た通過波の沖側波高及び浸水深に係る時刻歴データを図 2.5 に示す。
- ・図 2.5 の例では、津波が沖側から海岸線に近づくにつれ沖側波高の上昇や周期が短くなり、津波の先端部が急峻な壁状となる状態は認められない。よって、海岸線近傍で碎波は発生しないとみなすことができる。



出典) NRA 技術報告^(参2)

図 2.5 津波の碎波発生がないと推定される場合の水理試験から得た沖側波高・浸水深の時刻歴データの例

- ・津波の砕波発生があると推定する場合の例として、水理試験から得た通過波の沖側波高及び浸水深に係る時刻歴データを図 2.6 に例示する。
- ・図 2.6 の例では、津波が沖側から海岸線に近づくにつれ沖側波高が高くなりかつ周期が短くなり、海岸線近傍で砕波直前の最大浸水深及び最小周期となる特徴的な状態を示している。さらに、海岸線より陸側(約 50m 相当)では、砕波後の低い浸水深の状態を示しており、このことから、海岸線近傍で砕波が発生するとみなすことができる。



出典) NRA 技術報告^(参2)

図 2.6 津波の砕波発生があると推定する場合の水理試験から得た時刻歴データの例

【確認事項】

②防潮堤等に作用する砕波段波波圧の影響があると推定する場合、防潮堤等設置位置において防潮堤等がない場合の津波の砕波直前の最大浸水深(以下「段波最大浸水深(η_{\max_1st})」という。)の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて、砕波段波波圧の影響を評価していること。

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

・防潮堤等に作用する砕波段波波圧は、国交省の暫定指針の水深係数3の考え方を適用し、段波最大浸水深(η_{\max_1st})の3倍の高さに相当する静水圧分布する。防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{1st})の算定方法を式(2)に示す。

$$P_{1st} = 3\rho g \eta_{\max_1st} \quad (2)$$

P_{1st} : 段波最大浸水深(η_{\max_1st})の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力*

※ 前面の据付高さを基準高さ(防潮堤等の最下部の高さ)とする。

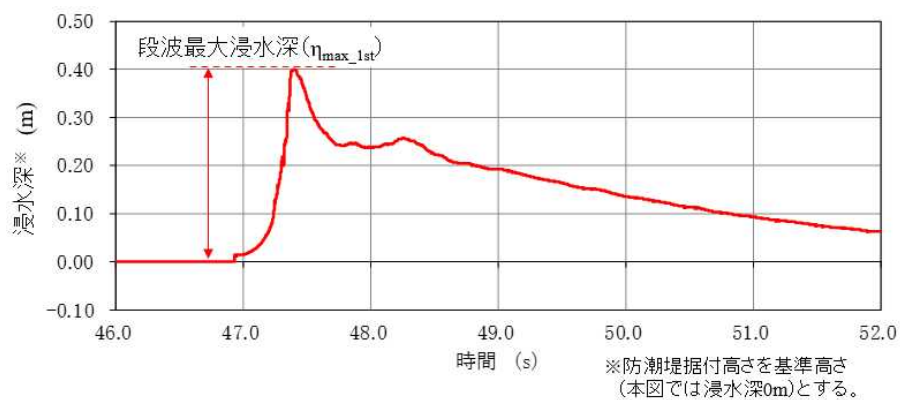
η_{\max_1st} : 段波最大浸水深

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

・図 2.7 出典) NRA 技術報告(参 2)

図 2.7 は、水理試験から得た防潮堤等設置位置における通過波の浸水深の時刻歴の一例であり、砕波直前の特徴的な状態を呈している。段波最大浸水深(η_{\max_1st})は、防潮堤等設置位置における段波領域での通過波の最大浸水深を表す。



出典) NRA 技術報告(参 2)

図 2.7 段波最大浸水深(η_{\max_1st})の例

(3) 波状段波波圧の影響評価

【確認事項】

- ①防潮堤等に作用する波状段波波圧の影響がないと推定する場合、その根拠が明確になっていること。その際、既往知見を根拠とする場合は、適切な条件による水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより、適用性に係る評価が示されていること。

【解説】

上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・「適切な条件による水理試験及び解析」については、根拠とする既往知見(例えば、国交省のガイドライン^(参5))との整合性を確認すること。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・国交省のガイドライン^(参5)では、おおむね入射津波高さが水深の30%以上(シミュレーション等による津波高さが水深の60%以上)で、かつ海底勾配が1/100以下程度の遠浅である場合に、波状段波が発生するとしている。

【確認事項】

- ②防潮堤等に作用する波状段波波圧の影響があると推定する場合、既往知見で提案されている評価手法等を用いて波状段波波圧の影響を評価していること。また、評価に用いた知見の適用性に関する文献等の根拠が示されていること。

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・「波状段波波圧の影響を評価していること」については、国交省のガイドライン^(参5)では、波状段波が発生する場合には、津波波圧が大きくなるため、これに対応して修正した谷本式(修正谷本式)を波力算定に用いることとしている。
- ・「文献等の根拠が示されていること」については、例えば、池野ら(2005)^(参7)による文献を指す。

2.3 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認

持続波圧評価に係る確認手順について図 2.8 に示す。フルード数(Fr)が1以下の場合は、水深係数を国交省の暫定指針の3とすることで、保守的に波圧を評価出来る。一方、フルード数(Fr)が1を超える場合、水深係数は3を超えうため、国交省の暫定指針の3を適用すると、非保守的な波圧評価となる可能性があることから、評価方法を分ける必要がある。通過波の持続波領域における防潮堤等設置位置での最大浸水深時刻におけるフルード数(Fr)が1を超える場合の確認手順については図 2.9 に示す。

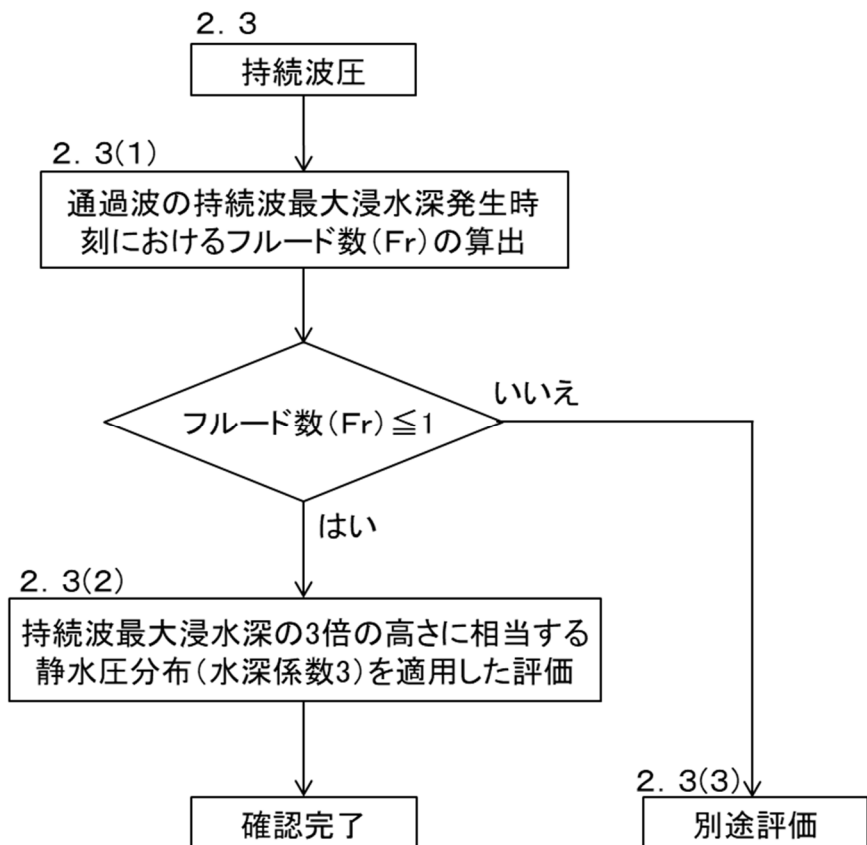


図 2.9 へ

図 2.8 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認手順

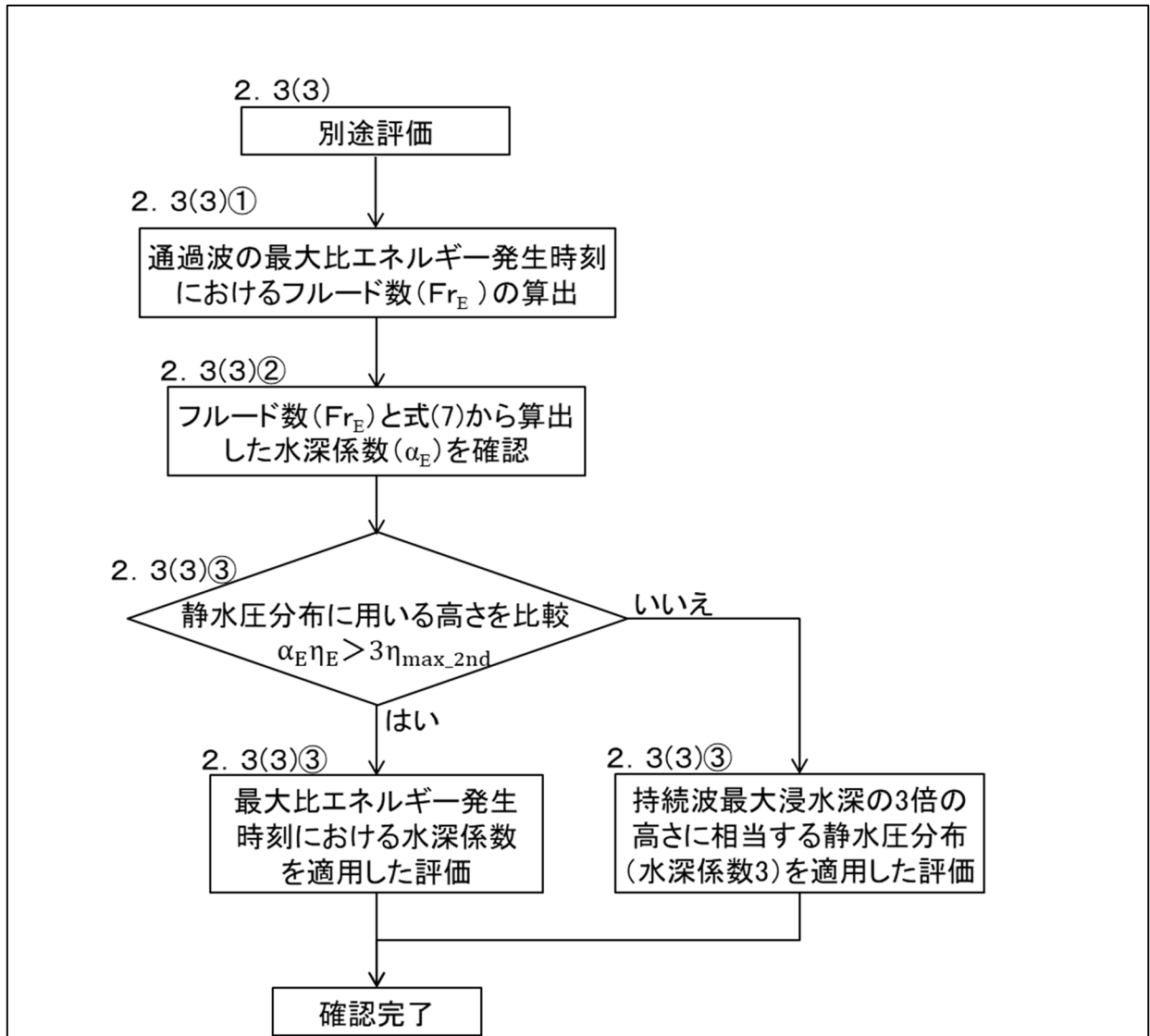


図 2.9 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認手順

(1) 持続波圧の影響評価

持続波圧の設定に関する根拠が明確に示されていること。

【確認事項】

- ① 通過波の持続波領域における防潮堤等設置位置での最大浸水深(以下「持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})」という。)を、設計用浸水深として用いていること及び持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻における浸水深及び流速からフルード数(Fr)を適切に算出していること。上記と異なる設計用浸水深及び流速を用いてフルード数(Fr)を算出する場合は、算出した数値の保守性を明示していること。

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・フルード数(Fr)及び(Fr_E)は流体の慣性力(勢い)と重力との比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標であり、防潮堤等に作用する津波の特性を把握する重要な指標となる。
- ・フルード数(Fr)及び(Fr_E)の算出に当たっては、通過波による防潮堤等設置位置での浸水深の時刻歴及び流速の時刻歴を用いるが、基準とする時刻によって浸水深及び流速は変動することからフルード数は異なる値となることに留意する。
- ・図 2. 10 に水理試験から得た、持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})及び最大比エネルギー(比エネルギー^{*3}の最大値)の発生時刻の関係について例示する。
- ・持続波圧の評価に当たっては、式(3)より持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻におけるフルード数(Fr)を算出する。

$$Fr = \frac{V_{\eta_{\max_2nd}}}{\sqrt{g\eta_{\max_2nd}}} \quad (3)$$

η_{\max_2nd} : 持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})

$V_{\eta_{\max_2nd}}$: 持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻における津波の流速

g : 重力加速度

*3: 比エネルギーは、単位体積重量の水の持つ全エネルギー(全水頭)を表す。ベルヌーイの定理を基に非粘性、定常及び一次元流れを仮定している。

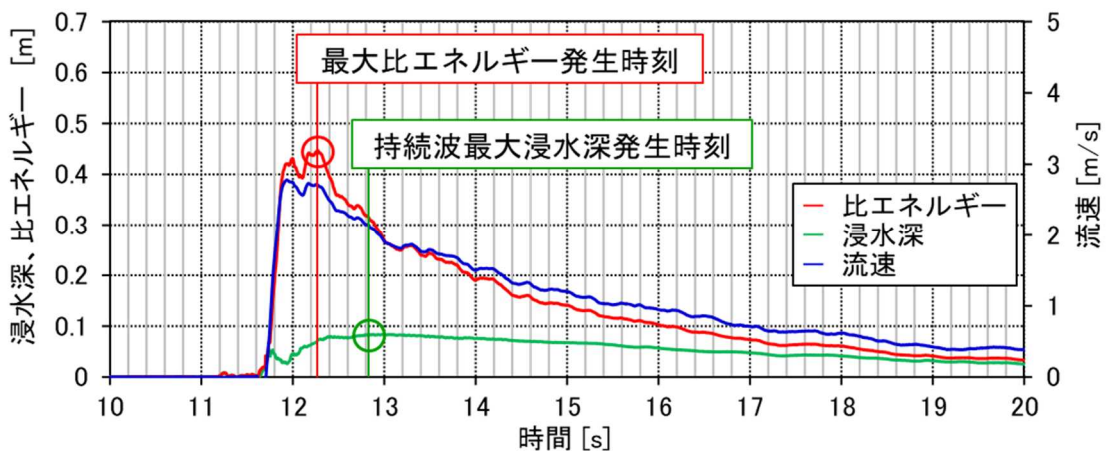
$$E(t) = \frac{v(t)^2}{2g} + \eta(t) \quad (4)$$

$E(t)$: 比エネルギー

$\eta(t)$: 防潮堤等がない場合の陸側における津波の浸水深の時刻歴

$v(t)$: 防潮堤等がない場合の陸側における津波の流速の時刻歴

g : 重力加速度



出典) NRA 技術報告^(参3)

図 2. 10 最大比エネルギー及び持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})の発生時刻の関係の例

(2)フルード数(Fr)が1以下の場合

【確認事項】

- ①フルード数(Fr)が1以下の場合、持続波圧の評価に当たり国交省の暫定指針を適用し、持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて持続波圧を評価していること。

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・フルード数(Fr)が1以下の場合、水深係数を国交省の暫定指針で採用している3とすることで保守的に津波波圧を評価できる。そのため、水深係数に3を採用していることを確認する。
- ・防潮堤等に作用する持続波圧は、持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布とする。防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})の算定方法を式(5)に示す。

$$P_{2nd} = 3\rho g \eta_{\max_2nd} \quad (5)$$

P_{2nd} : 持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部※に作用する圧力

※前面の据付高さを基準高さ(防潮堤等の最下部の高さ)とする。

η_{\max_2nd} : 持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

(3)フルード数(Fr)が1を超える場合

【確認事項】

- ①持続波最大浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻に基づくフルード数(Fr)が1を超える場合、持続波圧の評価に当たり防潮堤等位置での通過波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})を設計用浸水深として用いていること。最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)を適切に算出していること。

【解説】

上記の事項を確認するための留意事項を以下に示す。

- ・「最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)を適切に算出していること」については、持続波領域における最大比エネルギー発生時刻の浸水深(η_{E_max})及び流速(v_{E_max})が用いられていることを確認する。

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・持続波最大浸水深発生時刻のフルード数(Fr)が1を超えると、国交省の暫定指針における水深係数3の適用範囲から外れる場合があることが確認されている。
- ・最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)の算出方法を式(6)に示す。

$$Fr_E = \frac{V_{E_max}}{\sqrt{g\eta_{E_max}}} \quad (6)$$

η_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における津波の浸水深

V_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における津波の流速

g : 重力加速度

【確認事項】

- ②式(7)より、フルード数(Fr_E)から最大比エネルギー発生時刻における水深係数(α_E)を算出していること。水深係数を式(7)によらずに算出している場合は、水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより適用性に係る評価が示されていること。

$$\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93 \quad (\text{ただし、}\alpha_E < 3 \text{では}\alpha_E = 3 \text{とする}) \quad (7)$$

α_E : 最大比エネルギー発生時刻に基づく水深係数

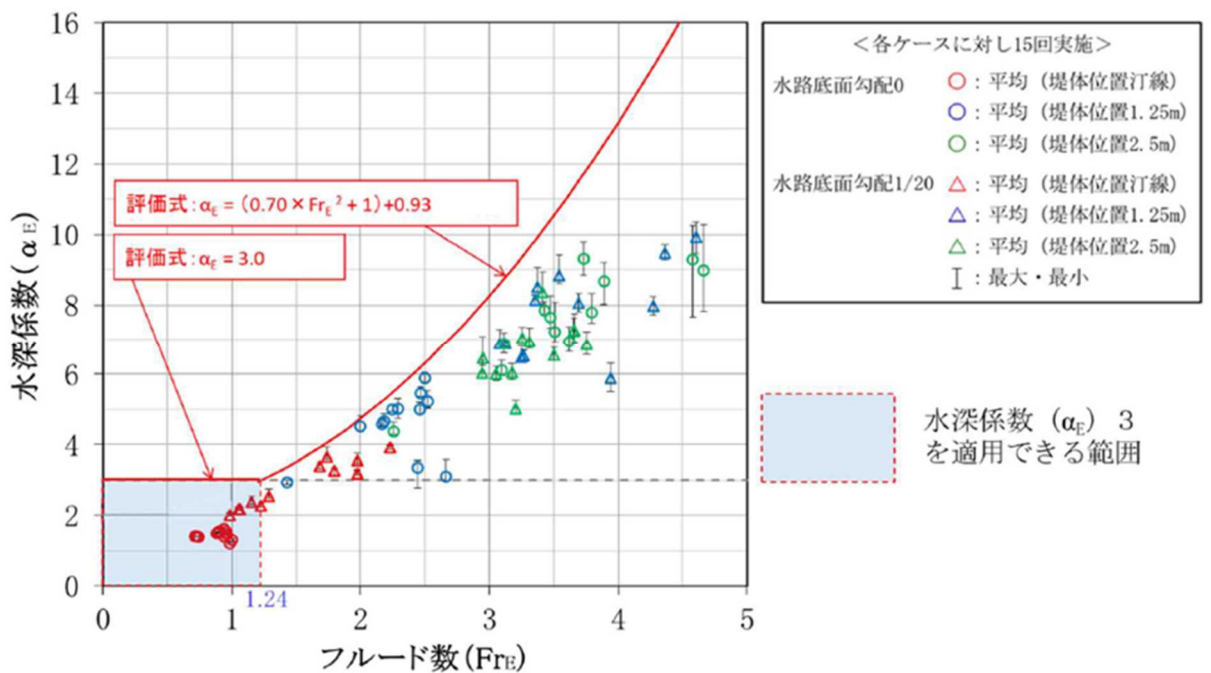
Fr_E : 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について^(参3)では、ベルヌーイの定理を基に非粘性、定常及び一次元流れの条件において、フルード数(Fr_E)から水深係数(α_E)を推定理論式^{*3}を導出した。式(7)はこの理論式と同じ構造の二次項と定数項1の二次関数を適用するとともに、非定常性を有する津波を模擬した水理試験によるばらつき等を考慮し導出した。
- ・この評価式により算出される水深係数(α_E)の最小値は3とし、式(7)で水深係数(α_E)<3と算出される場合、水深係数(α_E)は3と設定する。なお、式(7)はフルード数(Fr_E)2.5以下の試験結果を基に作成したが、フルード数(Fr_E)2.5を超える領域においても試験結果を包絡することを確認した(図2.11)。

^{*3} 理論式($\alpha_E = 0.50Fr_E^2 + 1$)は、通過波の堤体位置における最大比エネルギー(運動エネルギー及び位置エネルギー)を静水圧に全変換した場合のフルード数(Fr_E)と水深係数(α_E)の関係を示す二次関数で、二次項と定数項1の構造からなる。



出典) NRA 技術報告^(参4)

図 2.11 最大比エネルギー発生時刻に基づく持続波圧評価式と水理試験結果の関係

【確認事項】

③最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍に相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を持続波圧として評価していること。その算出方法を式(8)に示す。

さらに、式(5)で評価した持続波最大浸水深(η_{max_2nd})の3倍の高さと最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍の高さを比較し、値が大きくなる方を用いて持続波圧を設定していること。

$$P_E = \alpha_E \rho g \eta_{E_max} \quad (8)$$

P_E : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部^{*}に作用する圧力

^{*}前面の据付高さを基準高さ(防潮堤等の最下部の高さ)とする。

η_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

【解説】

上記の事項を確認するための技術的背景を以下に示す。

- ・フルード数(Fr)が1以下の場合において、持続波最大浸水深($\eta_{\max,2nd}$)の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})は、式(5)で算出される。
- ・フルード数(Fr)が1を超える場合において、最大比エネルギー発生時刻における浸水深($\eta_{E_{\max}}$)の水深係数(α_E)倍に相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)は、式(8)で算出される。
- ・式(5)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})と、式(8)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を比較して、値が大きくなる方を用いて持続波圧として設定する。すなわち、両者は($P_{2nd} = 3\rho g\eta_{\max,2nd}$)及び($P_E = \alpha_E\rho g\eta_{E_{\max}}$)であることから、($3\eta_{\max,2nd}$)及び($\alpha_E\eta_{E_{\max}}$)の両者の値の比較から以下のように設定する。

- ・($3\eta_{\max,2nd} \geq \alpha_E\eta_{E_{\max}}$)

両者の値の比較が上記となる場合は、フルード数(Fr)が1を超える場合であっても、式(5)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})を持続波圧として設定する。

- ・($3\eta_{\max,2nd} < \alpha_E\eta_{E_{\max}}$)

両者の値の比較が上記となる場合は、式(8)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を持続波圧として設定する。

参考文献・参考規格・基準類

- 参 1 原子力規制委員会 NRA 技術報告 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について NTEC-2014-4001 平成 26 年 12 月
- 参 2 原子力規制委員会 NRA 技術報告 防潮堤に作用する津波段波の影響について NTEC-2015-4001 平成 27 年 10 月
- 参 3 原子力規制委員会 NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について NTEC-2016-4001 平成 28 年 12 月
- 参 4 原子力規制委員会 NRA 技術報告 防潮堤に作用する最大持続波圧評価式の提案 NTEC-2022-4001 平成 4 年 7 月
- 参 5 国土交通省港湾局 防波堤の耐津波設計ガイドライン 平成 27 年 12 月
- 参 6 朝倉良介、ほか 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究 海岸工学論文集 第 47 巻(2000) pp.911-915
- 参 7 池野正明、松山昌史、榊山勉、柳沢賢 ソリトン分裂と碎波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究 海岸工学論文集 第 52 巻(2005) pp.751-755

NRA技術報告における津波の持続波圧評価式の再検討 — 令和2年度第40回原子力規制委員会指摘事項への対応等 —

令和3年7月21日
原子力規制庁

1. 経緯

原子力規制庁は、平成26年から平成28年にかけて、津波波圧評価に係る3編のNRA技術報告^{1,2,3}を公表した。

「令和2年度第40回原子力規制委員会（令和2年11月25日）」（以下「第40回原子力規制委員会」という。）において、原子力規制庁は、津波波圧の評価手法を審査で確認する観点から、NRA技術報告を基に「津波波圧評価に係る確認事項（案）」（以下「波圧確認事項」という。）を作成したことを報告した。また、この波圧確認事項を「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の別添として反映する作業を実施することが了承された。（【参考】参照）

その際、「最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)⁴と水深係数(α_E)の関係に基づく持続波圧評価式」（以下「持続波圧評価式」という。）に関し、水理試験結果⁵のばらつきの要因及び持続波圧評価式の保守性の考え方について質疑があり、規制庁より説明するよう指摘を受けた。

2. 水理試験結果のばらつきの要因

水理試験結果のばらつきの要因について改めて検討を行った。その結果、ばらつきの要因は、波圧計測結果の処理において水深係数(α_E)を保守的に見積もっていること及びフルード数(Fr_E)が大きい領域において流れの乱れが強くなることで作用波圧が低下する可能性があることの両者に起因していると分析した。（【別添1】参照）

3. 持続波圧評価式の再検討

（1）第40回原子力規制委員会で提案した持続波圧評価式

第40回原子力規制委員会では、以下の持続波圧評価式を提案した。

- 1 原子力規制委員会、NRA技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について、NTEC-2014-4001、平成26年12月
- 2 原子力規制委員会、NRA技術報告、防潮堤に作用する津波段波の影響について、NTEC-2015-4001、平成27年10月
- 3 原子力規制委員会、NRA技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について、NTEC-2016-4001、平成28年12月
- 4 流体の慣性力（勢い）と重力との比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標の一つ。
- 5 水理試験は、津波の海上伝播及び陸上の遡上を模擬する水路を用い、造波装置により津波を模擬した作用波を発生させた。通過波検定試験では、浸水深及び流速の計測結果を収集した。波圧試験では、水路の陸上の遡上部に設置した防潮堤試験体に作用する波圧の計測結果を収集した。

$$\alpha_E = 1.90 \times (0.50 \times Fr_E^2 + 1) \quad \dots \dots \dots \text{式 (1)}$$

この持続波圧評価式の設定においては、フルード数(Fr)1以下では、水深係数(α)に国土交通省の暫定指針⁶の水深係数3を適用することとした。

また、フルード数(Fr)1以上では、フルード数(Fr)1以下との連続性を考慮するとともに、水理試験結果のばらつきを包絡させる方針とした。この方針に基づき、水理試験結果のばらつきを対数正規分布として取り扱い、対数標準偏差+2 σ 及び+3 σ を考慮した式を検討したうえで、+3 σ を考慮した式が方針に合致すると考えた(図-1参照)。

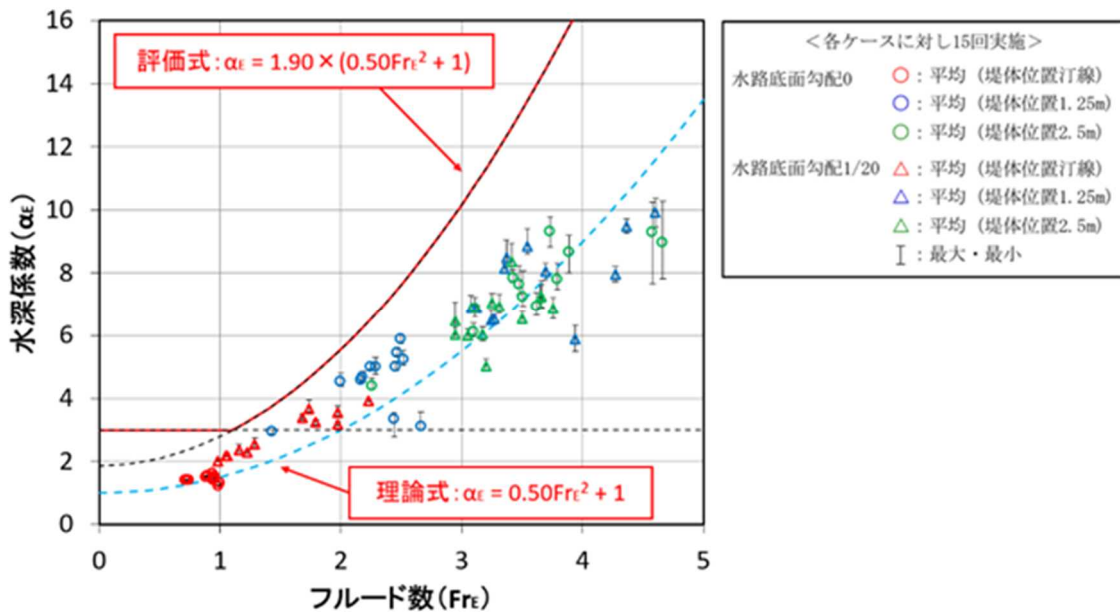


図-1 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)と水深係数(α_E)の関係に基づく持続波圧評価式

(2) 持続波圧評価式の再検討

上記(1)の持続波圧評価式は水理試験結果のばらつきを対数正規分布として取り扱ったが、その保守性の考え方を整理している過程において、本来は正規分布として取り扱う必要があったことが分かった。このため、式(1)に代えて、以下に示す持続波圧評価式を改めて設定した。

$$\alpha_E = 3.0 \quad (Fr_E \leq 1.24^7) \quad \dots \dots \dots \text{式 (2)}$$

$$\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93 \quad (Fr_E > 1.24) \quad \dots \dots \dots \text{式 (3)}$$

6 国土交通省、東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針、平成23年11月17日

7 フルード数(Fr_E)1.24は $\alpha_E = 3.0$ と $\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93$ の交点の値を示す。

式(2)は、国交省の暫定指針の水深係数3の適用について、水理試験結果を包絡する範囲で拡張したものである。

式(3)は、フルード数(Fr_E)0~2.5までの水理試験結果のばらつきを包絡することを基本に、フルード数(Fr_E)0~2.5までの水理試験結果を対象とした回帰式⁸に対し標準偏差+2 σ を考慮した。この結果、全水理試験結果のばらつきをほぼ包絡している。

なお、フルード数(Fr_E)0~2.5までの水理試験結果を対象としたのは、実プラントでのフルード数(Fr_E)の実績及びその他の影響等を考慮したことによる。
 (【別添2】参照)

第40回原子力規制委員会での提案と今回設定した持続波圧評価式の比較を以下に示す(図-2参照)。

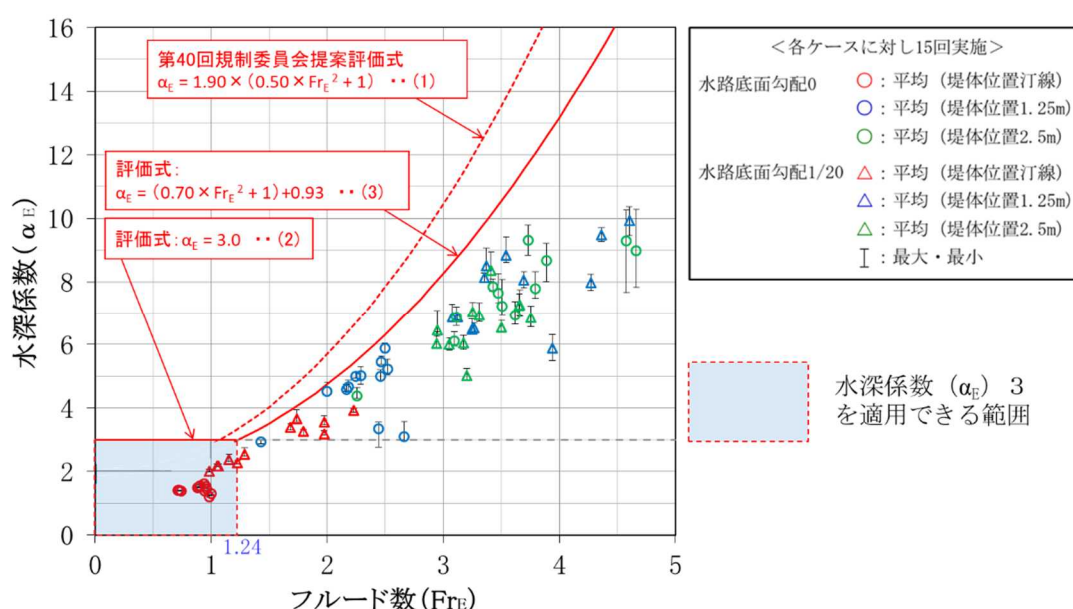


図-2 第40回原子力規制委員会での提案と今回設定した持続波圧評価式の関係

4. 今後の進め方

NRA 技術報告³では、第40回原子力規制委員会での提案した持続波圧評価式を評価式導出例として記載しており、今回改めて策定した持続波圧評価式を反映のうえ改訂することとしたい。

「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の別添となる波圧確認事項に、今回改めて策定した持続波圧評価式を反映のうえ、今後「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の改訂案を原子力規制委員会に諮ることとしたい。

⁸ $\alpha_E = 0.70 \times Fr_E^2 + 1$: フルード数(Fr_E)0~2.5までの水理試験結果から導出した。